

Análisis y Diseño del Mecanismo Actuador para Falange Proximal de un Dedo Antropomórfico

Piña Quintero Roberto¹, Moya Sánchez Edgar¹, Avilés Sánchez Oscar Fernando², Portilla Flores Edgar Alfredo¹, Niño Suarez Paola Andrea², M. Aurora Molina Vilchis¹

¹ CIDETEC-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica, Av. Juan de Dios Bátiz, S/N, Esq. Miguel Othón de Mendizábal, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, México, D.F., 07700, México.

² Universidad Militar Nueva Granada, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Grupo de Investigación en Mecatrónica DAVINCI, Cr. 11 No. 101-80, Bogotá D. C., Colombia.
rpinaq0800@ipn.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un mecanismo actuador para la falange proximal de un dedo robot con características antropomórficas. Dicho mecanismo se implementa utilizando una configuración cruzada de cuatro barras la cual permite el seguimiento de diez posiciones de precisión de la barra de salida de dicho actuador. El cálculo de las dimensiones de los elementos del mecanismo actuador se llevan a cabo mediante el método de mínimos cuadrados para la minimización del error en cada posición. Se presentan los resultados obtenidos y la simulación en CAD del mecanismo propuesto.

Palabras clave: Mecanismo de cuatro barras, dedo antropomórfico, diseño paramétrico.

1. Introducción

Los sistemas robóticos avanzados están pasando del concepto clásico de estructuras precisas y rígidas, muchas veces pesadas y complejas, a estructuras más flexibles y livianas, con la perspectiva de un aumento en su desempeño, alta simplicidad mecánica y en consecuencia con una considerable reducción de costos.

Dado que el objetivo en este artículo es diseñar un mecanismo actuador mediante la utilización de un sistema de cuatro barras para construir la falange proximal de un dedo antropomórfico cuyo funcionamiento es similar al de la mano humana, es necesario realizar inicialmente una revisión de anatomía de ésta.

La mano humana está compuesta por un conjunto de huesos que forman la palma (metacarpo), de la que surgen cinco ramas o dedos; a su vez está

unida al antebrazo por los huesos de la muñeca (carpo) [1]. Cada dedo está conformado por 3 huesos llamados falanges los cuales permiten 4 grados de libertad (dos en la articulación con la muñeca ó metacarpo-falangeal y dos con cada falange) a excepción del dedo pulgar que tiene 5 grados de libertad. La suma de todos da una estructura compleja de 21 grados de libertad. Además, está compuesta por músculos y ligamentos que permiten una significativa destreza (ver Fig. 1). El estudio del agarre humano como modelo ha llevado a la construcción de innovadores pero costosos prototipos de dedos, para ser utilizados como partes funcionales de robots antropomórficos. Ejemplos de este tipo de trabajos son los dedos utilizados en las manos de Stanford/JPL Hand [2], Utah/MIT Hand [3], SPRING Hand [4], DLR Hand [5], UNT Hand [6], UMNG Hand [7]. Otros trabajos relacionados con el desarrollo de dedos son el de M. Cecarelli et. al [8] el cual propuso la cinemática del movimiento de dedos humanos usando secuencias de grabación de video y foto como una metodología para determinar la función de movimiento. García et. al [9] utiliza un sistema de actuación que emula el sistema muscular del dedo el cual es representado por un sistema de transmisión basado por tendones. Lotti et. al [10] desarrollaron un dedo que consta de dos grados de libertad, de bajo peso, que utiliza eslabones rígidos unidos con elementos flexibles, los actuadores empleados son de desplazamiento lineal.

Las manos robóticas requieren un especial trabajo de diseño debido a su capacidad de operación: la flexión de todos los dedos y la movilidad del pulgar, permiten sostener objetos. Las soluciones no son fáciles de implementar y, por lo general, requieren de sistemas especiales de engranajes, o actuadores poco comunes, muy miniaturizados así como diversos tipos de implementaciones elasto-mecánicas para los tendones artificiales. En el presente trabajo, para

simular mecánicamente estas funciones, se utilizó un mecanismo de cuatro barras el cual permite obtener las características de movimiento antes mencionadas, es decir que si se asume que todos los dedos, excepto el pulgar, son similares en su funcionamiento se podría reproducir los dedos necesarios para la construcción de una mano robótica.

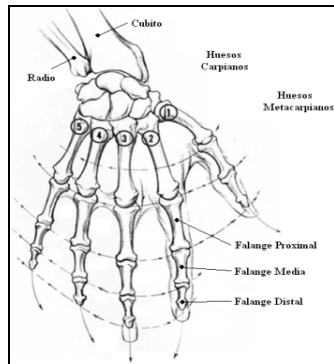


Fig. 1. Fisiología de una mano humana

El presente artículo contiene las siguientes secciones: en la sección 2 se describe el dedo antropomórfico propuesto por Avilés et al. [11], en esta sección se muestra el diseño de CAD y el equivalente funcional de un mecanismo actuador el cual es un mecanismo cruzado de cuatro barras. El análisis matemático del mecanismo actuador mediante ecuaciones de cierre de circuito para la obtención de la Ecuación de *Freudenstein* se muestra en la sección 3. Los resultados numéricos obtenidos para las ecuaciones de diseño del mecanismo actuador considerando diez posiciones de precisión experimentales así como una discusión de los mismos, se exponen en la sección 4. Finalmente, la sección 5 contiene las conclusiones del presente trabajo.

2. Descripción del dedo antropomórfico

En Avilés et. al [11] se presenta el diseño y construcción de un dedo robótico, donde la entrada es un tornillo sinfin para conversión de movimiento rotacional en lineal, así mismo se lleva a cabo un análisis experimental a partir de simulaciones en CAD del movimiento del dedo. El mecanismo está integrado por dos mecanismos cruzados de cuatro barras acoplados entre ellos, (ver Fig. 2a) con sus respectivas tres falanges F1, F2 y F3. En la Fig. 2b se observa el mecanismo donde el movimiento lineal del par AB, activa el primer mecanismo DHIEJ mediante el par rotacional C, así mismo el par rotacional K activa al segundo mecanismo GFML,

con la finalidad de que dicho mecanismo sea capaz de describir la trayectoria deseada.

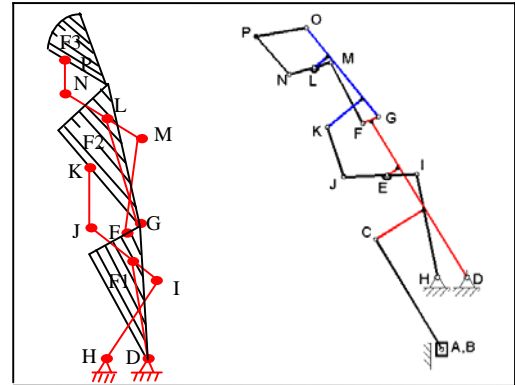


Fig. 2a. Mecanismo del dedo índice.

Fig. 2b. Mecanismo analítico del dedo índice.

Por lo anteriormente expuesto, es de nuestro interés estudiar el mecanismo cruzado de cuatro barras acopladas que equivale a la falange proximal F1, del dedo. Donde HD son respectivamente el eslabón fijo, DE es el eslabón de entrada, IE es eslabón acoplador y HI es el eslabón de salida, (ver Fig. 2b).

3. Diseño del mecanismo de cuatro barras

Considérese el mecanismo cruzado de un grado de libertad de cuatro barras representado vectorialmente, (ver Fig. 3). Este mecanismo forma una cadena cinemática cerrada para la cual se hizo el análisis de posición, con base al ángulo de entrada θ_3 y tomando al eslabón r_4 fijo.

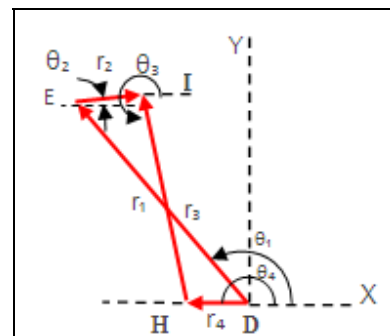


Fig. 3. Mecanismo cruzado de cuatro barras

Sea la ecuación de cierre de mecanismo o de circuito siguiente:

$$\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 + \mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_4 = 0 \quad (1)$$

Expresada en términos de los componentes X y Y, y considerando que el mecanismo debe cumplir con las posiciones de precisión deseadas, se tiene entonces que.

Componentes en X:

$$r_1 \cos \theta_{1i} + r_2 \cos \theta_{2i} + r_3 \cos \theta_{3i} - r_4 \cos \theta_{4i} = 0 \quad (2)$$

Componentes en Y:

$$r_1 \sin \theta_{1i} + r_2 \sin \theta_{2i} + r_3 \sin \theta_{3i} - r_4 \sin \theta_{4i} = 0 \quad (3)$$

Donde el sub índice “i” corresponde a la *i*-ésima posición de precisión que debe cumplir el mecanismo.

Despejando el término que involucra las variables de entrada y de salida, tenemos:

$$\cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) = -\frac{r_4}{r_3} \cos \theta_{1i} - \frac{r_4}{r_1} \cos \theta_{3i} + \frac{r_2^2 - r_1^2 - r_3^2 - r_4^2}{2r_1 r_3} \quad (4)$$

Considerando:

$$k_1 = -\frac{r_4}{r_3}, \quad k_2 = -\frac{r_4}{r_1}, \quad k_3 = \frac{r_2^2 - r_1^2 - r_3^2 - r_4^2}{2r_1 r_3} \quad (5)$$

La ecuación (6) se conoce como Ecuación de *Freudenstein*, la cual permite calcular analíticamente un mecanismo que cumple las posiciones de precisión deseadas.

$$\cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) = K_1 \cos \theta_{1i} + K_2 \cos \theta_{3i} + K_3 \quad (6)$$

Para obtener un mínimo de error en las posiciones de precisión, se utiliza el método de mínimos cuadrados por lo que se define una función para ser cumplida en cada *i*-ésima posición del mecanismo, es decir:

$$D = \sum_{i=1}^n [\cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) - k_1 \cos \theta_{1i} - k_2 \cos \theta_{3i} - k_3]^2 \quad (7)$$

Para obtener el menor error entre los ángulos de las posiciones de precisión deseadas, se debe cumplir:

$$\frac{\partial D}{\partial k_1} = 0, \quad \frac{\partial D}{\partial k_2} = 0, \quad \frac{\partial D}{\partial k_3} = 0 \quad (8)$$

Al desarrollar las ecuaciones (8), estas se pueden expresar como un sistema de ecuaciones en

forma matricial obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_{1i} & \sum_{i=1}^n \cos \theta_{1i} \cos \theta_{3i} & \sum_{i=1}^n \cos \theta_{1i} \\ \sum_{i=1}^n \cos \theta_{1i} \cos \theta_{3i} & \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_{3i} & \sum_{i=1}^n \cos \theta_{3i} \\ \sum_{i=1}^n \cos \theta_{1i} & \sum_{i=1}^n \cos \theta_{3i} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \cos \theta_{1i} \cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) \\ \sum_{i=1}^n \cos \theta_{3i} \cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) \\ \sum_{i=1}^n \cos(\theta_{1i} - \theta_{3i}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde los coeficientes k_1 , k_2 y k_3 son los coeficientes de la ecuación de *Freudenstein*. Al resolver el sistema de ecuaciones dado por (9), y proponiendo un valor para el eslabón fijo r_4 se pueden determinar la longitud de los demás eslabones.

4. Resultados Numéricos

Con el propósito de obtener las dimensiones del mecanismo actuador, se llevaron a cabo las implementaciones de dos programas en MATLAB® para el cálculo requerido. Utilizando 10 posiciones de precisión mostradas en la Tabla 1, se obtuvieron los valores de los eslabones del mecanismo actuador de la Tabla 2.

Tabla 1. Relación entre el ángulo de entrada y salida teóricos.

Posición	Angulo de entrada y salida	
	θ ₃ (rad)	θ ₁ (rad)
1	3.9357	1.0400
2	4.1277	1.2574
3	4.3197	1.5410
4	4.5117	1.7736
5	4.7037	2.0165
6	4.8956	2.2205
7	5.0876	2.4094
8	5.2796	2.5722
9	5.4716	2.7305
10	5.6636	2.8828

Tabla 2. Valor de las dimensiones del mecanismo.

Eslabón	Longitudes (mm)
r1	30.6130
r2	6.9973
r3	24.7825
r4	6.9989

La Fig. 5 muestra el diseño en CAD de la falange proximal con las dimensiones obtenidas. Así mismo en el gráfico 1 se sobreponen las curvas de los datos experimentales y las curvas obtenidas con los datos teóricos. Como puede observarse, el error existente en cada una de las posiciones de precisión

es despreciable por lo tanto el mecanismo diseñado es capaz de describir la trayectoria deseada.

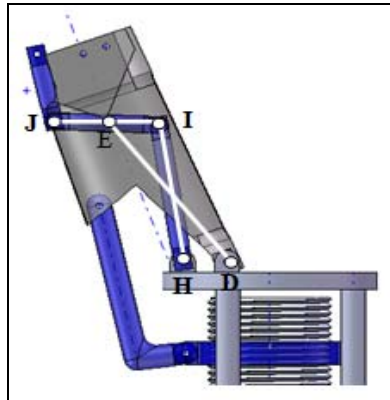


Fig. 5. Diseño en CAD de la falange proximal.

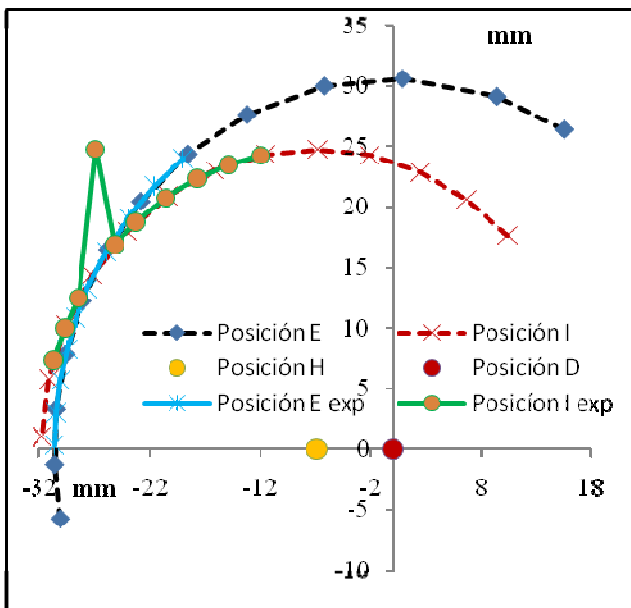


Gráfico 1.- Resultados teóricos y experimentales.

5. Conclusiones

Se llevó a cabo el análisis cinemática y el diseño del mecanismo actuador para la falange proximal de un dedo antropomórfico de un grado de libertad. Los resultados obtenidos son basados en un metodología de diseño que considera la funcionalidad del dedo antropomórfico diseñado previamente, por lo que cambios en las dimensiones del dedo pueden ser fácilmente reflejados en el

mecanismo. Trabajos futuros están dirigidos a obtener la descripción completa de los mecanismos que componen al dedo en su totalidad. Lo anterior como parte de una metodología de diseño integrado para sistema mecatrónicos.

Referencias

- [1] F. Quiroz Gutiérrez, *Anatomía Humana*, Ed. Porrúa México. 1962, pp. 264-277.
- [2] Matthew T. Mason, J. Kenneth Salisbury Jr. "*Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*". The MIT Press Series in Artificial Intelligence. 1985.
- [3] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, and K. B. Biggers. "*The UTAH/MIT dextrous hand: Work in progress*". In *Robot, Grippers*, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [4] M. C. Carrozza, C. Suppo, F. Sebastiani, B. Massa, F. Vecchi, R. Lazzarini, M. R. Cutkosky and P. Dario. "The SPRING Hand: Development of a Self-Adaptive Prosthesis for Restoring Natural Grasping", *Autonomous Robots*, vol. 16, no. 2, marzo de 2004. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/m3023725t7518203/>.
- [5] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch, and H. Liu. "*DLR's multisensory articulated hand*" In Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mayo 1998.
- [6] O. F. Avilés Sánchez, P. Leon Simanca y G. Calle T. "Dedos para grippers Robóticos - Revisión Bibliográfica.", *Scientia et Technica*, vol. 11, no. 27, pp. 97-103, Abril 2005.
- [7] Ocampo Gustavo A. Rondón Julián, "*Diseño y Construcción de una Mano Robot de Cuatro Dedos que Imite los Modelos Prensiles Humanos*", Universidad Militar Nueva Granada, 2004.
- [8] M. Ceccarelli, N. Eduardo Nava Rodriguez, G. Carbone. "Optimal Design of Driving Mechanism in A 1-D.O.F. Anthropomorphic Finger.", *Mechanism and machine theory*, vol. 41, no. 8, pp. 897-911, 2006.
- [9] F. García, J. Martínez Álvarez, R. J. Saltarén Pazmiño, A. Guerrero González, y J. López Coronado. "Diseño Mecatrónico de un Dedo Antropomórfico Universidad Politécnica de Cartagena / Murcia, España. Disponible en: http://www.ceafac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/H_05_R.pdf.

[10] F. Lotti, G. Basura, .A Novel Approach to Mechanical Design of Articulated Fingers for Robotic Hands. Disponible en: http://www.diem.ing.unibo.it/personale/lotti/Articoli_UBhandIII%5CROS_02PDF

[11] O. Fernando. Avilés, P. L. Simanca y P. A. Niño, .Diseño y Construcción de un Dedo para Grippers Robóticos., presentado en el Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Perú, 2007.

[12] J. Edward Shigley y J. Joseph Uicker, *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, Mc Graw Hill, México 1988.